

Analyse und Design frequenzunabhängiger Multimode-Antennen für MIMO und Diversity

Von der Fakultät für Elektrotechnik und Informatik
der Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover
zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor - Ingenieur

abgekürzt: Dr.-Ing.

genehmigte

Dissertation

von

Dipl. - Ing. Oliver Klemp
geboren am 11.11.1976 in Hannover

2008

Referent:	Prof. Dr.-Ing. Hermann Eul
Korreferent:	Prof. Dr.-Ing. Thomas Kaiser
Tag der Promotion:	9. Mai 2007

Berichte aus der Hochfrequenztechnik

Oliver Klemp

**Analyse und Design frequenzunabhängiger
Multimode-Antennen für MIMO und Diversity**

Shaker Verlag
Aachen 2008

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Zugl.: Hannover, Leibniz Univ., Diss., 2007

Copyright Shaker Verlag 2008

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8322-7185-5

ISSN 0945-0793

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9

Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Klemp, Oliver:

„Analyse und Design frequenzunabhängiger Multimode-Antennen für MIMO und Diversity“

Kurzfassung:

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit den Konzepten frequenzunabhängiger Mehrarmantennen zur Realisierung mehrerer, voneinander unabhängiger Übertragungsmodi. Strukturen dieser Art weisen im praktischen Betrieb Übertragungsbandbreiten auf, die gut für die Auslegung multistandard-konformer Antennensysteme geeignet sind. Darüber hinaus können derartige Strukturen für die Verwendung in neuartigen, ultra-breitbandigen Übertragungssystemen zum Einsatz kommen. Aufgrund der geringen Frequenzabhängigkeit der Impedanz- und Strahlungs-Kenngrößen zeichnen sie sich darüber hinaus für den Einsatz mit variablen statisch- oder dynamisch auftretenden, dielektrischen Belastungen im Antennen-Nahfeld aus. Hierbei ermöglicht die Anwendung symmetrischer Mehrarmantennen die Anregung mehrerer, orthogonaler Richteigenschaften hinsichtlich Polarisation und Richtdiagramm. Diese sind simultan über räumlich voneinander getrennte und elektromagnetisch entkoppelte Tore zugänglich. Im Gegensatz zur Anwendung von Raum-Diversitykonzepten ermöglicht die Implementierung von Diagramm- und Polarisationsdiversität bei kompakten Antennen eine beachtliche Diversity-Effizienz. Die analysierten Antennen werden für eine Abdeckung im Frequenzbereich zwischen 1 GHz und 6 GHz betrachtet, in dem eine Vielzahl an Übertragungsfrequenzen für den mobilen Einsatz angesiedelt sind.

Im Vordergrund stehen bei dieser Untersuchung vierarmige logarithmisch-periodische Planarantennen, die aufgrund ihres polarisations-invarianten Übertragungsverhaltens für Applikation mit dualer Polarisation geeignet sind. Zusätzlich bieten sie die Möglichkeit zur Integration in mobile Endgeräte mit attraktiven Formfaktoren. Zur Reduktion der Baugröße werden geeignete Geometrievariationen in numerischen Feldsimulationen betrachtet und bewertet. Durch Anwendung neuartiger, geometrischer Miniaturisierungsverfahren wird das Potential aufgezeigt, inwieweit die erforderliche Grundfläche der Antennenstrukturen weiter reduziert werden kann. Die Evaluation der synthetisierten Strahler erfolgt messtechnisch durch Charakterisierung der Impedanz- und Richteigenschaften. Zusätzlich werden planare Leitungsstrukturen zur Speisung der symmetrischen Mehrarmantennen sowie planare und periodische Raumfilterstrukturen untersucht und messtechnisch betrachtet. Systemsimulationen werden zur Bewertung der Eignung von symmetrischen Mehrarmantennen hinsichtlich ihrer Diversity-Effizienz bei Multimode-Diversity Anwendungen herangezogen und gegenüber konventionellen Diversity-Anordnungen bewertet. Zusätzlich wird die Möglichkeit zum Einsatz der Strahler für die Verwendung in Multiple-Input Multiple-Output (MIMO) Systemen evaluiert und bewertet.

Zur Reduktion des Berechnungsaufwandes für systembasierte Studien des Übertragungsverhaltens von Kommunikationssystemen unter dem Einfluss realer Antennenelemente wird auf die Charakterisierung des Abstrahlungsverhaltens über das System der sphärischen Eigenwellen zurückgegriffen. Basierend auf Konvergenzuntersuchungen mit konventionellen Berechnungsverfahren wird demonstriert, dass sich dieser orthonormale Feldansatz sehr gut zur effizienten Analyse von Diversity- und MIMO-Systemen eignet. Als großer Vorteil erweist sich hierbei die erreichte Separation zwischen den Kenngrößen zur Beschreibung des Übertragungskanal und den Strahlungsparametern der analysierten Antennen. Diese ermöglicht eine unabhängige Betrachtung von Antennen- und Kanaleigenschaften.

Schlagwörter: Multimoden-Antennen, Frequenzunabhängige Antennen, Diversity-Empfang, MIMO Übertragung, Sphärische Eigenwellenentwicklung, Kanalmodellierung

Klemp, Oliver:

„Analysis and Design of Frequency-Independent Multimode Antennas for MIMO and Diversity“

Abstract:

This work covers the investigation of frequency-independent multiarm antennas that are subject to multimode radiation. In practical realizations, antenna elements of that kind provide large bandwidths that meet the requirements of multistandard antenna terminals for the coverage of a multiplicity of wireless communication services. In addition, they can easily be adopted for being used in ultra wideband communications. Due to their inherent robustness towards static- or dynamic loading effects of the antenna near field region, those wideband antennas are predestined to be deployed in mobile use cases. The multiarm concept defines the feasibility to excite multiple radiation modes with orthogonal polarization- and pattern properties. Those can be accessed simultaneously via spatially separated and electromagnetically decoupled antenna ports. Compared to conventional space diversity concepts the application of pattern- and polarization diversity techniques provides significant potential for space-time processing even at small handheld terminals. The antenna geometries will be designed to provide coverage in a frequency band between 1 GHz to 6 GHz that defines the target range of wireless services for mobile usage.

Logarithmically-periodic four-arm antennas mark the initial point for the investigation due to their ability of simultaneously supporting radiation modes with orthogonal polarization. Thus, they are well suited to be adopted in wireless transmission systems with dual linear polarization. Novel antenna shapes will be introduced in order to drive miniaturization to its limits. Furthermore, dedicated miniaturization techniques will be applied that are based on a geometrical modification of the antenna arm contours. At this stage, antenna analysis and optimization is performed by using commercial field simulation tools. The evaluation of the synthesized antenna concepts is conducted by methods of measurement of the relevant impedance- and radiation behavior. Antenna related work will be completed by investigations regarding the application and realization of suitable modeforming networks in microwave stripline technology. In order to improve the antenna's efficiency and to furthermore reduce sensitivity to parasitic coupling effects, planar and periodic filter structures are researched in addition.

An evaluation of the diversity efficiency that can be obtained by introducing such symmetrical multi-arm antennas is subject to dedicated link analysis on a systems level. In this context, the applicability of the investigated multimode antenna technology is also qualified for Multiple-Input Multiple-Output (MIMO) transmission schemes.

The application of spherical mode analysis for the characterization of the radiation behavior is applied to effectively reduce the computational complexity for system-based analysis of the transmission behavior in diversity- and MIMO-applications. Convergency studies demonstrate the applicability of this orthonormal field approach for an efficient system analysis accounting for the impact of realistic antenna radiation behavior. A key benefit is related to the mathematical separation between antenna- and channel related quantities. This property enables an autonomous investigation of the antenna- and channel behavior.

Keywords: Multimode antennas, frequency-independent antennas, diversity reception, MIMO communications, spherical wave approach, channel modeling

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner gut vierjährigen Tätigkeit am Institut für Hochfrequenztechnik und Funksysteme der Leibniz Universität Hannover. Zu dieser Zeit zogen mich die Themen der selbstkomplementären Antennen, der analytischen Eigenfeldentwicklung sowie der digitalen Signalverarbeitung für MIMO- und Diversity-Systeme regelrecht in ihren Bann. Sie waren Triebfeder für eine fruchtbare und umfangreiche, wissenschaftliche Analyse der jeweiligen Eigenschaften und Interdependenzen. Doch ohne die Unterstützung meiner Kollegen, Freunde und Familienangehörigen wäre die Bewältigung der Arbeit nicht durchführbar gewesen. Es gibt eine Reihe von Menschen, die großen Anteil an dem erfolgreichen Zustandekommen dieser Arbeit haben und denen ich ganz herzlich danken möchte.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Hermann Eul für die überaus konstruktive Zusammenarbeit und lehrreiche Zeit am Institut. Ihm verdanke ich fachliche Anleitung in Form thematischer Diskussionen, eine ungebremschte Motivation sowie geeignete Ratschläge und Hilfestellungen in fast allen Lebenslagen. Ich möchte mich ganz herzlich bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Thomas Kaiser für die bereitwillige Übernahme des Korreferats bedanken. Seine überaus freundliche, konstruktive und motivierende Art sind stets eine Inspiration. Herrn Prof. Dr.-Ing. Klaus Jobmann danke ich für die freundliche Übernahme des Prüfungsvorsitzes.

Im Rahmen meiner Tätigkeit hatte ich das große Glück, eine Reihe von überaus begabten Menschen kennen zu lernen, die durch die Anfertigung von Studien-, Diplom- und Masterarbeiten zum Gelingen meiner Dissertation maßgeblich beigetragen haben:

Ganz herzlich möchte ich mich bedanken bei den Diplomingenieuren Gunnar Armbricht, Phongsakorn Damnoen, Sven Karsten Hampel, Daniel Kornek, Oliver Schmitz und Micha Schultz. Für die schöne gemeinsame Zeit in Raum 1720 und die Vielzahl an inspirierenden, fachlichen Diskussionen danke ich insbesondere Herrn Dipl.-Ing. Gunnar Armbricht. Mein weiterer Dank gilt all meinen Kollegen für eine ereignisreiche und schöne Zeit am Institut für Hochfrequenztechnik und Funksysteme in Hannover.

Aufgrund Ihrer tatkräftigen Unterstützung bei der Anfertigung und Durchsicht meiner Arbeit möchte ich mich besonders herzlich bei Frau Prof. Dr.-Ing. Ilona Rolfes bedanken. Herrn Dr.-Ing. Oliver Büchel sowie Herrn Dr.-Ing. Thomas Musch danke ich für die Vielzahl an Hilfestellungen und Ratschlägen während meiner Zeit am Institut. Herrn Dr.-Ing. Michael Camp danke ich für seine hervorragende Unterstützung in sämtlichen Fragestellungen im Bereich um die erfolgreiche Durchführung und Abgabe meiner Dissertation. Ein großer Dank gilt auch den Herren Prof. Dr.-Ing. Heinz Chaloupka und Prof. Dr.-Ing. Burkhard Schiek für ihre fachliche Beratung während meiner Assistenz.

Einen überaus herzlichen Dank möchte ich den folgenden Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern am Institut für Hochfrequenztechnik und Funksysteme sagen:

- Herrn Paul Haße für Prototypen-Materialien sowie Unterstützung, Beratung und Gespräch in einer Vielzahl von Lebenslagen.
- Der feinmechanischen Werkstatt um Herrn Eckehard Batzdorfer für die Bereitstellung von Prototypen, Messfassungen und mechanischen Aufbauten.
- Dem Sekretariat um Frau Bettina Richter, Frau Marion Meier und Frau Marita Lanka für die Durchführung administrativer Aufgaben jeglicher Art, der Organisation von Dienstreisen und der freundlichen Hilfe bei der Abgabe meiner Dissertation.

Mein Dank gilt auch meinem ehemaligen Nachbarn, Herrn Dr.-Ing. Hans-Joachim Golz, der stets geeignete Ratschläge für die Anfertigung meiner Arbeit hatte.

Abschließend möchte ich mich ganz besonders bei meinen Eltern Marianne und Heinz Klemp bedanken. Ohne deren Hilfestellung und Beratung sowie finanzielle Unterstützung während des Studiums ich nie in den Genuss der Anfertigung dieser Doktorarbeit gekommen wäre. Besonders herzlich bedanke ich mich auch bei meiner Freundin Nina, die trotz der ein- oder anderen Nachtschicht, Wochenendarbeit oder Dienstreise während der gesamten Zeit stets zu mir gehalten hat und mich immer wieder motiviert hat.

Inhaltsverzeichnis

Formelzeichen und Abkürzungen	1
1 Einleitung	7
1.1 Stand der Technik	11
1.2 Systembeschreibung und Realisierungsvorhaben	13
1.3 Gliederung der Arbeit	14
2 Nutzbarmachung von Schwundmechanismen in mobilen Nachrichtensystemen	16
2.1 Raumzeitmodellierung des mobilen Übertragungskanals	17
2.1.1 Impulsantwort des Übertragungskanals	18
2.1.2 Einfluss der Bandbreite	20
2.1.3 Kenngrößen mobiler Nachrichtenkanäle	22
2.1.4 Der schmalbandige Single-User Mobilfunkkanal mit additivem Rauschen	27
2.1.5 Stochastische Kanalmodelle	28
2.2 Einfluss der Antennenkorrelation	31
2.2.1 Nutzbare Diversitätsdimensionen	36
2.3 Der mittlere, effektive Antennengewinn	38
2.4 Antennenkorrelation durch Impedanzbeschreibung	41
2.5 Verkopplungseinfluss auf Impedanz- und Feldebene	43
2.6 Prinzipien des Diversity-Empfangs	46
2.7 Allgemeine Funktionsweise drahtloser MIMO-Übertragungssysteme	49
2.8 Bedingungen für multimodale Antennensysteme in mobilen Einsatzszenarien	51
2.8.1 Antennenstrukturen für den Polarisationsdiversity-Empfang	53
2.8.2 Definition von Polarisation und Polarisationsreinheit	54
3 Diagrammsynthese durch Eigenfeldentwicklung	56
3.1 Eigenfeldansatz für das magnetische Vektorpotential	57
3.2 Anwendung der Fraunhofer-Näherung	61
3.3 Die allgemeine Antennenrichtcharakteristik	62
3.3.1 Berücksichtigung des Gruppenfeldansatzes	64
3.4 Eigenfeldentwicklung durch Diagrammanpassung	65
3.4.1 Fehlerkriterien und Konvergenzbetrachtungen	67
3.5 Eigenfeldentwicklung mittels Analyse des Oberflächenstromes	68
3.5.1 Implementierung eines Algorithmus zur Fernfeldberechnung	71
3.5.2 Anwendung einer Nahfeldberechnungsmethode	72
3.5.3 Konvergenzuntersuchungen	73
3.6 Eigenwellenanalyse zur Bestimmung der Antennenperformance in Schwundsszenarien	79
3.6.1 Beschreibung durch Diagrammanpassung	80

3.6.2	Beschreibung durch Analyse des Oberflächenstromes	82
4	Breitbandantennen für Mehrgrößen-Übertragungssysteme	85
4.1	Frequenzunabhängige Antennen	86
4.1.1	Das Prinzip der Selbstkomplementarität	87
4.1.2	Das Winkelprinzip	90
4.1.3	Das Prinzip der Selbstähnlichkeit	91
4.2	Planare Spiralantennen	93
4.2.1	Abstrahlungsmodell und Formfaktor	95
4.3	Planare logarithmisch-periodische Antennen	96
4.3.1	Einheitszellen für das Antennendesign	98
4.3.2	Die logarithmisch-periodische Transformation	99
4.3.3	Funktionsprinzip der log.-per. Planarantenne	100
4.4	Eigenwellenanalyse der Vierarmantenne	101
4.5	Strukturen mit optimaler Strahlungsdämpfung	104
4.5.1	Variation der Berandungsfunktion	107
4.5.2	Variation der Periodenanzahl	108
4.5.3	Variation der Winkelvarianz	110
4.6	Die planare Trapezantenne	113
4.6.1	Variation der Trapezsteigung	117
4.7	Multimode-Funktionalität der planaren, log.-per. Antenne	118
4.7.1	Die log.-per. Multimode-Trapezantenne	120
4.8	Geeignete Miniaturisierungsverfahren	122
4.8.1	Radiale Modulation	123
4.8.2	Azimuthale Expansion	126
5	Antennensysteme für den Diversity-Empfang	129
5.1	Konzepte für die Diversity-Kombinierung	130
5.2	Modellierung des mehrdimensionalen Diversityempfängers	133
5.3	Diversität in Dipolarrays	135
5.3.1	Einfluss der gegenseitigen Interelementarverkopplung	137
5.3.2	Untersuchung einer Kreuzdipolanordnung	139
5.3.3	Potential von Multimode-Antennenstrukturen	140
5.4	Ein Diversity-Systemsimulator basierend auf SME-Ersatzkenngrößen	142
5.4.1	Untersuchung linearer Dipolkonfigurationen	143
6	MIMO-Übertragungssysteme	148
6.1	Allgemeines MIMO-Kanalmodell	149
6.1.1	Eigenwerte und Kanalkapazität	152
6.2	Realisiertes Modell einer MIMO-Übertragungsstrecke	155
6.3	Analyse linearer Dipol-Antennenanordnungen	157
6.4	Verfahren zur Anhebung der Kanalkapazität	159
6.4.1	Beamforming	160
6.4.2	Waterfilling	161
6.5	Ein MIMO-Systemsimulator basierend auf SME-Ersatzkenngrößen	163
6.6	SME-Analyse des MIMO-Übertragungsverhaltens linearer Dipolarrays	164
6.6.1	Einfluss des Gruppenfaktors	168

7	Prototypen-Aufbauten und Ergebnisse	172
7.1	Messung von Antennenkenngrößen	173
7.1.1	Messaufbau für Streuparametermessungen	173
7.1.2	Messaufbau für Nahfeldmessungen	174
7.2	Die log.-per. Trapezantenne	175
7.2.1	Breitband-Speisenetzwerk für symmetrische Antennen	179
7.2.2	Betrieb mit zirkularer Polarisierung	183
7.2.3	Einfluss geometrischer Miniaturisierungsverfahren	185
7.2.4	Eigenfeldanalyse des Strahlungsfeldes	189
7.2.5	Strukturen mit Modendiversität	194
7.2.6	Gruppenantennenanordnungen	196
7.3	Unterdrückung parasitärer Strahlungseffekte	200
7.3.1	Hochimpedanz-Oberflächen als planare Raumfilter	201
7.3.2	Planare Trapezantenne mit Hochimpedanz-Oberfläche	203
7.4	Breitbandantennen für den Diversityempfang	204
7.4.1	Eine Breitbandantenne mit Diagramm-Diversität	210
7.4.2	Gruppenantenne mit Raum- und Polarisationsdiversität	211
7.4.3	Systemperformance aus SME-Eigenfeldentwicklung	213
7.5	Breitbandantennen für die MIMO-Übertragung	216
7.5.1	Systemperformance aus SME-Eigenfeldentwicklung	218
8	Zusammenfassung und Ausblick	221
8.1	Zusammenfassung	221
8.2	Ausblick	224
A	Sphärische Eigenwellenspektren ausgewählter Antennenstrukturen	235
A.1	Besonderheiten der Eigenfeldentwicklung symmetrischer Mehrarmantennen	235
A.1.1	Geometrische Interpretation des Abbruchkriteriums für sphärische Eigenfeldentwicklungen	238
A.2	Eigenfeldentwicklung für log.-per. Trapezantennen	239
A.2.1	Variation der Flankensteilheit	240
A.2.2	Variation der Periodenanzahl der Basisfunktion	240
A.2.3	Variation der Winkelspreizung	242
A.3	Korrelationsberechnung durch Analyse des Oberflächenstromes	244
A.4	Korrelationsanalyse bei deterministischem Welleneinfall	250
B	Fotografien und Abbildungen	252